

CdSe 核辐射探测器中的 MIS 接触电极*

金应荣^{1,2} 朱世富² 赵北君² 陈松林² 何福庆³

(1 西华大学材料科学与工程系, 成都, 610039)

(2 四川大学材料科学系, 成都, 610064)

(3 四川大学原子核科学技术研究所, 成都 610064)

摘要: 对 MIS(金属-绝缘体-半导体)接触电极的特性进行了系统的分析和实验观察. 结果表明, 负极的电子可以通过表面能级和热激发注入到 CdSe 晶片中, 且晶片表面的电子能级密度越高, 电子注入就越快, 探测器的漏电流也越大. 对探测器进行适当的热处理, 可以降低表面能级密度, 从而抑制电子注入, 降低探测器的漏电流, 改善探测器的能量分辨率.

关键词: CdSe 探测器; 漏电流; MIS 接触电极

PACC: 2940; 7340S; 7340Q

中图分类号: O485 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2004)10-1301-05

1 引言

接触电极对探测器的漏电流等特性有重要的影响. 在过去的研究中, 人们虽然在 CdSe 晶片上制作电极, 并对 CdSe 晶体进行了一些电学测试^[1], 甚至还对 CdSe 探测器进行了一些初步研究^[2-4], 但没有对接触电极的性能进行系统的研究. 对 CdTe 探测器进行的研究表明, 具有 PIN 结构的探测器由于具有较低的漏电流和比较均匀的电场分布因而具有较好的性能^[5-7]. CdSe 晶体具有很强的自补偿效应, 是一种单极性的 n 型半导体材料^[8], 通常在单极性半导体材料表面只能制作 MIS 接触电极, 为此本文对 CdSe 探测器中 MIS 接触电极的特性进行了分析与测试. 结果表明, CdSe 晶片表面的电子能级位于距导带底约 1.1eV 处, 且表面的电子能级密度越高, 电子注入就越快, 探测器的漏电流也就越大. 对探测器进行适当的热处理, 可以降低表面能级密度, 使探测器的漏电流降低到 10^{-12} A 量级, 从而改善探测器的能量分辨率.

2 探测器制作与测试

实验所用晶体是用垂直无籽晶气相法生长的电阻率为 $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ 量级的 CdSe 单晶体^[9]. 沿(110)晶面切割晶片, 并磨平、抛光; 用 5% 溴甲醇腐蚀晶片, 去掉表面形变层; 用双氧水氧化形成 CdSeO₃ 绝缘层^[10], 通过控制氧化时间来控制绝缘层的厚度, 然后用去离子水清洗干净. 在晶片两面涂石墨导电胶并粘接引线后, 作为探测器的电极. 此后进行适当的热处理(见表 1), 消除表面能级的影响. 探测器的晶片厚度为 0.6~0.7mm, 电极面积约为 16~20mm². 用硅橡胶将晶片粘接在聚四氟乙烯基片上, 连接好引线, 用铝质外壳封装, 从而完成探测器的制作.

表 1 探测器的退火温度与退火时间

Table 1 Annealing temperature and time of detectors

Detector	1#	2#	3#	4#	5#
Temperature/°C	100	100	—	—	220
Time/h	1	1	—	—	0, 2, 4

* 国家高技术研究发展计划及四川省学术和技术带头人基金资助项目

金应荣 男, 1965 年出生, 副教授, 博士研究生, 从事专业: 材料物理与化学.

朱世富 通信作者, 男, 1945 年出生, 教授, 从事专业: 材料物理与化学.

2003-10-08 收到, 2004-01-13 定稿

用 ZC36 型超高电阻微电流测试仪测试探测器的伏安曲线, 用于能谱测试的主要设备有电荷敏感前置放大器、成型放大器、多道分析器及计算机辅助系统等. 能谱测试前用一枚标准的 HgI₂ 探测器校准系统, 测试能谱时, 用探测器的负电极面作为射线的入射面, 并通过对 ²⁴¹Am 59.5keV 谱线的探测结果来表征探测器的性能^[11]. 所有测试工作均在 25℃ 的空调间进行, 测试所用加热设备为装有 PEX-C900 精密数字控温仪的烘箱, 温度测量误差小于 1℃.

3 接触电极的特性分析

为了便于对实验数据进行处理, 对实验结果进行正确的分析, 在研究接触电极的特性之前, 对具有 MIS 接触电极的探测器漏电流特性进行初步分析.

3.1 MIS 接触电极中的电荷输运

当金属的功函数大于 n 型半导体的功函数时, MIS 结在热平衡时的能带图如图 1(a) 所示. 其中各函数的定义与 Schottky 结中的相同. 当绝缘层较薄 (小于 5nm) 时, 在负偏压 (金属上加负电压) 作用下, 金属电极中的电子有可能注入到半导体中. 对于理想的 MIS 接触电极, 当 $-qV_p > q\phi_{bn}$ (V_p 是偏置电压 V 在绝缘层上引起的分压) 时, 金属中的电子可

以通过隧道效应穿过绝缘层注入到半导体中, 如图 1(b) 所示, 而 $-qV_p < q\phi_{bn}$ 时, 没有电子注入; 如果半导体表面有一定密度的表面能级, 则表面能级中的电子可以通过热激发进入导带, 同时金属电极中的电子也可能通过隧道效应注入到表面能级中, 如此就会形成电子注入, 如图 1(c) 所示, 此时即使 $-qV_p < q\phi_{bn}$, 也会有电子注入. 显然表面能级密度越高, 温度越高, 电子就容易注入.

3.2 具有 MIS 接触电极的 CdSe 探测器漏电流

如图 1(c) 所示, 当表面能级密度足够高以至于对电子注入没有限制作用时, 探测器的漏电流特性与具有 MSM (金属-半导体-金属) 结构探测器的漏电流特性相似, 可表示为^[12]

$$I = AA^{**} T^2 \exp\left[-\frac{q\phi_{bn}}{kT}\right] \exp\left[q\frac{\sqrt{qE/4\pi\epsilon_s}}{kT}\right] \quad (1)$$

$$E = \sqrt{\frac{2qN_D}{\epsilon_s} \left[V + V_b - \frac{kT}{q}\right]}$$

其中 A 是有效电极接触面积; A^{**} 是有效里查逊常数; ϕ_{bn} 是 Schottky 结的势垒高度; ϵ_s 是 CdSe 的介电常数; N_D 是 CdSe 中施主杂质的浓度; V_b 是 MSM 结构中的内建势; V 是偏置电压.

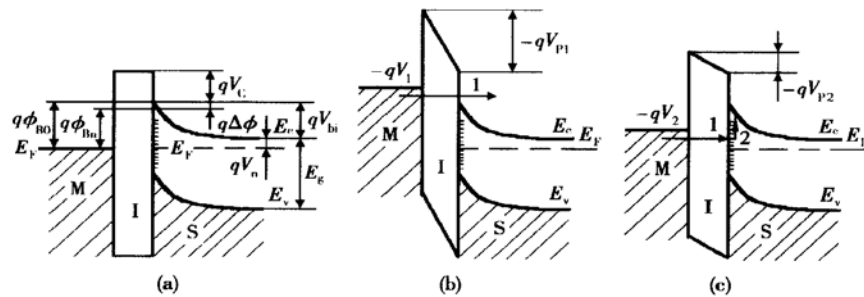


图 1 MIS 接触电极中的电子注入方式

Fig. 1 Manners of electron injection in MIS contact (a) Energy band diagram at thermal equilibrium; (b) Injection from metal to conduction band; (c) Injection by means of surface energy levels and thermal exciting

当表面能级有限时, 在 (1) 式中引入与表面能级密度有关的系数 f 来表示表面能级对电子注入的影响, 则电子注入引起的漏电流为

$$I = fAA^{**} T^2 \exp\left[-\frac{q\phi_{bn}}{kT}\right] \exp\left[q\frac{\sqrt{qE/4\pi\epsilon_s}}{kT}\right] \quad (2)$$

其中 $0 \leq f \leq 1$. 没有表面能级时, $f = 0$; 表面能级密度足够高以至于对电子注入没有限制作用时, $f = 1$. 由于偏置电压 V 可以选得比 $V_b - kT/q$ 大得多, 可略去 $V_b - kT/q$ 的影响, 于是有

$$\ln I = \left[\ln(fAA^{**} T^2) - \frac{q\phi_{bn}}{kT} \right] + \frac{q}{kT} \left[\frac{q^3 N_D}{8\pi^2 \epsilon_s^3} \right]^{1/4} V^{1/4} \quad (3)$$

或

$$\ln(I/T^2) = \ln(fAA^{**}) - \left[\frac{q\Phi_{in}}{kT} - \frac{q}{k} \times \left[\frac{q^3 N_D}{8\pi^2 \epsilon_s^3} \right]^{1/4} V^{1/4} \right] \frac{1}{T} \quad (4)$$

这表明当温度一定时, 在一定的电压范围内, $\ln I$ 与 $V^{1/4}$ 成正比; 当电压一定时, 在一定温度范围内, $\ln(I/T^2)$ 与 $1/T$ 成正比。

4 实验结果与分析

4.1 探测器的漏电流特性

图 2 是 CdSe 探测器的三种典型漏电流曲线, 1# 和 2# 探测器的漏电流为 10^{-12} A 量级(700V)。其中 1# 探测器的漏电流曲线可以分为三段: 当偏置电压较低(低于 10V)时, 探测器的漏电流很低, 且几乎不变; 随着偏置电压增加, 漏电流逐渐增加, 当偏置电压增加到 700V 之后, 漏电流跳跃性增加。在 10~700V 之间, 1# 探测器的 $\ln I - V^{1/4}$ 图具有较好的直线关系, 这表明该探测器的晶片表面有一定密度的电子陷阱能级(此时 $0 \leq f \leq 1$); 2# 探测器在漏电流跳跃性增加之前没有缓慢增加的过程, 表明该探测器晶片的表面能级密度很低(此时 $f \rightarrow 0$); 3# 探测器漏电流较大, 没有跳跃性增加, 且 $\ln I - V^{1/4}$ 图具有较好的直线关系, 表明该探测器晶片的表面能级密度较

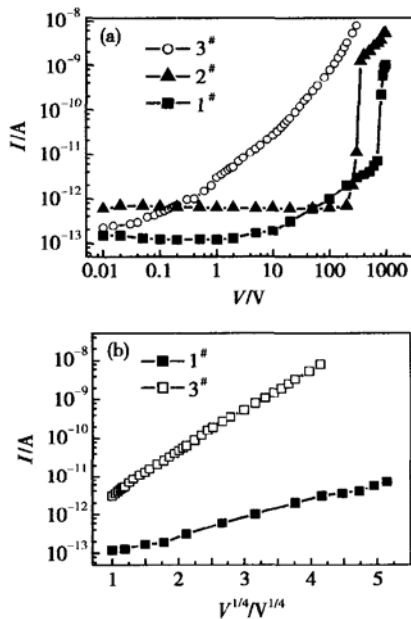


图 2 CdSe 探测器的漏电流

Fig. 2 Leakage current of CdSe detectors

高(此时 $f \rightarrow 1$), 其漏电流特性与具有 MSM 结构的探测器漏电流特性一致。

可见, 表面电子能级密度越高, MIS 接触电极对电子注入的阻止作用越弱。

4.2 表面能级的位置

由于电子注入过程依赖热激发过程, 所以表面能级的位置对电子注入有重要的影响, 根据(4)式可以对表面能级的位置进行初步测定。图 3 和表 2 是 1# 和 4# 探测器的测试与计算结果, 可见表面能级距离导带底约 1.1eV, 到价带顶的距离约为禁带宽度的三分之一, 这与文献[13]的论述一致。

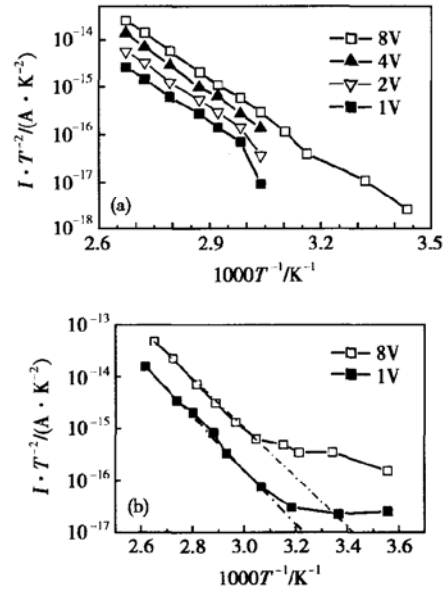


图 3 1# (a) 和 4# (b) 探测器的激活能曲线

Fig. 3 Active energy curves of 1# (a) and 4# (b) detectors

表 2 根据图 3 计算的电子注入的激活能 eV

Table 2 Active energy calculated from Fig. 3 eV

Density of donors / cm^{-3}	Bias voltage/V					
	1#				4#	
	1	2	4	8	1	8
10^{16}	1.04	1.06	1.16	1.09	1.06	0.99
10^{17}	1.06	1.08	1.19	1.13	1.08	1.03
10^{18}	1.10	1.13	1.25	1.19	1.13	1.10

4.3 退火对表面能级密度的影响

按照图 1(c) 所示的电子注入方式, 要降低探测器的漏电流, 必须降低表面能级的密度。对探测器加热退火, 可以促进原子和空间电荷扩散, 使半导体和

绝缘层的晶格匹配趋于合理, 电荷分布更加均匀, 从而降低表面能级密度. 表 1 和图 2 表明, 经过退火处理的 1[#] 和 2[#] 探测器的漏电流比未退火的 3[#] 探测器的漏电流低 2~3 个数量级, 而 3[#] 探测器晶片的表面能级密度比表面原子密度 ($\sim 6.6 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$) 低, 由此推断氧化退火后表面能级密度在 $6.6 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 以下. 进一步的退火实验结果如图 4 所示, 可见随着退火时间增加, 探测器的漏电流降低. 这充分表明退火能有效降低表面能级密度, 从而减小电子注入速度, 降低探测器的漏电流.

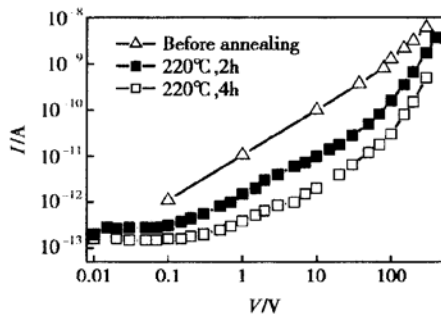


图 4 加热退火对 5[#] 探测器漏电流的影响

Fig. 4 Effect of annealing on leakage current

4.4 探测器的能谱特性

图 5 是用 CdSe 探测器测得的 ^{241}Am 59.5keV 能谱图, 用 2[#] 探测器测得的谱峰半高宽约为 6keV,

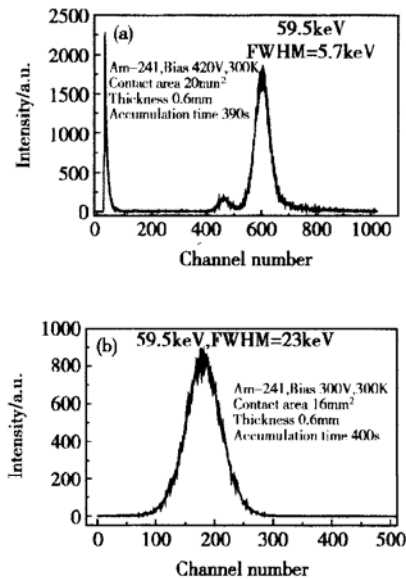


图 5 用 2[#] 和 3[#] 探测器测得的 ^{241}Am 能谱图

Fig. 5 Energy spectra taken from ^{241}Am with 2[#] (a) and 3[#] (b) detectors

而用 3[#] 探测器测得的谱峰半高宽约为 23keV, 可见探测器漏电流越低, 能量分辨率就越高.

5 结论

通过对 CdSe 探测器中 MIS 接触电极的特性进行测试分析, 可以得到如下结论:

(1) 在具有 MIS 接触电极的 CdSe 探测器中, 电子可以借助表面能级和热激发过程注入到半导体中. 表面能级密度越高, 注入的电子就越多, 探测器的漏电流就越大;

(2) CdSe 晶片的表面能级位于距导带底约 1.1eV 处;

(3) 热处理退火可以降低表面能级密度, 从而降低探测器的漏电流(可以达到 10^{-12}A 量级), 改善探测器的能量分辨率.

参考文献

- [1] Manfredotti C, Rizzo A, Vasanelli L. Electronic trapping levels in cadmium selenide single crystals. *J Appl Phys*, 1973, 44 (12): 5463
- [2] Burger A, Shilo I, Schieber M. Cadmium selenide: A promising novel room temperature radiation detector. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1983, 30(1): 368
- [3] Buegre A, Roth M. Growth of medium electrical resistivity CdSe single crystal by the temperature gradient solution zoning technique. *J Cryst Growth*, 1984, 67: 507
- [4] Chen H, Hayse M, Ma X, et al. Physical properties and evaluation of spectrometer grade CdSe single crystal. *SPIE*, 1998, 3446: 17
- [5] Khusainov K, Antonova T A, Lysenko V V, et al. Energy resolution of large area CdTe p-i-n detectors with charge loss correction. *Nucl Instrum Method*, 2001, A458: 242
- [6] Niraula M, Mochizuki D, Aoki T, et al. High resolution CdTe nuclear radiation detectors in a new M-π-n design. *Nucl Instrum Method*, 2001, A458: 478
- [7] Matsumoto C, Takahashi T, Takizawa K, et al. Performance of a new Schottky CdTe detector for hard X-ray spectroscopy. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1998, 45(3): 428
- [8] Zhou Yongrong. *Semiconductor materials*. Beijing: Press of Beijing Institute of Science and Technology, 1992: 183 (in Chinese) [周永溶. 半导体材料. 北京: 北京理工大学出版社, 1992: 183]
- [9] Jin Yingrong, Zhu Shifu, Zhao Beijun, et al. Vapor growth and electrical properties of CdSe crystals with excess Cd. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22(9): 1139 (in Chinese) [金

- 应荣, 朱世富, 赵北君, 等. 富镉 CdSe 单晶体的生长及其电学特性. 半导体学报, 2001, 22(9): 1139]
- [10] Tian Minbo, Liu Deling. Handbook of film science and technology (second volume). Beijing: Mechanical Industry Press, 1991: 637(in Chinese)[田民波, 刘德令. 薄膜科学与技术手册(下册), 北京: 机械工业出版社, 1991: 637]
- [11] Jin Yingrong, Zhu Shifu, Zhao Beijun, et al. Noise and leakage current in CdSe detectors with MSM structure. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(8): 835(in Chinese)[金应荣, 朱世富, 赵北君, 等. CdSe 核辐射探测器的噪声与漏电流. 半导体学报, 2002, 23(8): 835]
- [12] Sze S M. Physics of semiconductor devices. Second edition. Translated by Huang Zhengang. Beijing: Electronic Industry Press, 1987: 194, 441(in Chinese)[施敏, 著. 半导体器件物理学(第二版). 黄振岗, 译. 北京: 电子工业出版社, 1987: 194, 441]
- [13] Liu Enke, Zhu Bingsheng. Semiconductor physics. Beijing: National Defense Industry Press. 1979: 159(in Chinese)[刘恩科, 朱秉升. 半导体物理学. 北京: 国防工业出版社, 1979: 159]

MIS Contacts in CdSe Nuclear Radiation Detectors^{*}

Jin Yingrong^{1,2}, Zhu Shifu², Zhao Beijun², Chen Songlin² and He Fuqing³

(1 Department of Materials Science and Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

(2 Department of Materials Science, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

(3 Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: The properties of MIS(metal-insulator-semiconductor) contacts in CdSe nuclear radiation detectors at room temperature are investigated by measuring the leakage current of CdSe detectors. It is shown that electrons can be injected from cathode into CdSe wafers by means of surface trap levels and thermal exciting, and the more the surface trap levels, the larger the leakage current of CdSe detector. The density of surface trap levels can be lowered by annealing, so the leakage current of CdSe detectors can be decreased and the energy resolution can be improved too.

Key words: CdSe detector; leakage current; electrical contact

PACC: 2940; 7340S; 7340Q

Article ID: 0253-4177(2004)10-1301-05

* Project supported by National High Technology Research and Development Program of China, and Foundation of Leader of Academic and Technology of Sichuan Province

Jin Yingrong male, was born in 1965, associate professor, PhD candidate. He is engaged in the research on material physics and chemistry.

Zhu Shifu, male, was born in 1945, professor. He is engaged in the research on material physics and chemistry.

Received 8 October 2003, revised manuscript received 13 January 2004

©2004 The Chinese Institute of Electronics